

平成 21 年 6 月 3 日現在

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2006～2008

課題番号：18684013

研究課題名（和文） 量子ホール系端状態における局所的スピン偏極率決定

研究課題名（英文） Experimental studies of spin polarization in quantum Hall edge states

研究代表者

町田 友樹（MACHIDA TOMOKI）

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：00376633

研究成果の概要：

量子ホール系における局所的な電子スピン偏極率を実験的に決定するため、抵抗検出型核磁気共鳴におけるナイトシフト測定と核スピン緩和時間の決定を行った。本研究では量子ホール端状態および量子ホールバルク状態を利用した2種類の核スピン制御手法を実現し、これらを利用した。前者においては端状態間電子散乱に伴う電子スピン反転、後者では量子ホール効果ブレークダウンに伴う電子スピン反転を用いている。いずれも超微細相互作用を通じて核スピンを動的に偏極することが可能であり、電気抵抗値の変化として核スピン偏極が検出できる。素子上の微小コイルによる核スピン量子状態のコヒーレント制御、スピンエコーによるコヒーレント時間の決定、電子スピン-核スピン間超微細相互作用のゲート電界制御によるナイトシフト測定を実現した。量子ホール端状態を利用した手法により、量子ホール端状態近傍におけるナイトシフトの空間分布検出にも成功した。本研究で得られた成果により、既存の実験技術ではアクセスできなかった電子スピン偏極率に関する情報を得るための強力な実験手法が確立された。核スピンをプローブとすることで、量子ホール系におけるスピン物性で鍵となる局所的な電子スピン偏極率の決定や電子スピンドイナミクス情報が検出できることになり、今後の研究への展開が期待できる。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2007年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2008年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
年度			
年度			
総計	17,000,000	5,100,000	22,100,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性

キーワード：量子ホール効果

## 1. 研究開始当初の背景

量子ホール効果は強磁場中二次元電子系において、ランダウ量子化・アンダーソン局在・電子間相互作用が織りなす固体物理

学上の最も美しい現象の1つである。整数量子ホール系の電子輸送現象においては量子ホール端状態が重要な役割を果たすことが示されており、その描像はスピン偏極ま

で含めて確立されている。一方、分数量子ホール系においては端状態描像が全く確立しておらず、量子ホール強磁性の発現、複数スピンドメインの発見など、スピンの重要な役割を果たす現象が注目を集めている。そこで鍵となる情報が局所的な電子スピン偏極率である。ところが理論的な描像はなく、実験的にも局所的な電子スピン偏極を調べる手段がなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では、核スピンをプローブとして利用することにより分数量子ホール系の局所的な電子スピン偏極率を実験的に決定する手法を確立することを目的とした。申請者は、量子ホール端状態を利用した半導体核スピンの電気的コヒーレント制御を既に実現している(研究開始以前)この手法では、量子ホール端状態による初期化と微小コイルによる局所的な高周波磁場印加により、半導体素子中のナノスケール領域の核スピンのみを選択的に制御・検出している。従って、この技術を利用することにより、ナノスケール領域のスピン物性情報など、既存の実験技術ではアクセスできなかった情報を得られるという着想に至った。本研究ではこの手法をさらに発展させて空間分解測定を行い、量子ホール系の局所的な電子スピン偏極率分布を実験的に決定する。量子ホール系のスピン物性解明への直接的な情報を手に入れる。

## 3. 研究の方法

抵抗検出型核磁気共鳴では局所領域の核スピン偏極が検出できることを利用して、ナイトシフト測定により局所的電子スピン偏極率を決定する。幅広い磁場およびランダウ準位充填率に対して実験を行い、さらに平行磁場を印加してゼーマン分離とクーロンエネルギーの比を変化させることで、量子ホール系における電子スピンの果たす役割をクーロン相互作用との関連も含めて解明する。電子スピン偏極率の定量的決定には核磁気共鳴によるナイトシフト観測が最も直接的である。ところが通常のピックアップコイルを用いた核磁気共鳴では局所領域の核スピンのみの情報を得ることができず、実験的情報を得るための壁であった。そこで、本研究では量子ホール端状態における電子スピン-核スピン間超微細相互作用を利用した動的核スピン偏極と微小コイルによる局所的な高周波磁場印加により、量子ホール素子中のナノスケール領域の核スピンのみを選択的に制御・検出する手法を利用する。本実験手法は申請者独自の技術であり、通常の核磁気共鳴の $10^5$ 倍以上の感度を持つ、半導体材料中のナノス

ケール(幅 10nm 程度)領域の核スピンのみを選択的に初期化・制御・検出可能、端状態の位置を制御することで任意の位置の核スピン偏極を制御・検出できる、という特色がある。

## 4. 研究成果

### 量子ホール系端状態における局所領域ナイトシフト測定

抵抗検出型核磁気共鳴では局所領域の核スピン偏極が検出できることを利用して、ナイトシフト測定を通じて局所的電子スピン偏極率を決定することが可能である。そこで、抵抗検出型核磁気共鳴を用いた局所領域ナイトシフト測定の実験技術を確立した。量子ホール系端状態における電子スピン-核スピン相互作用を利用して核スピンを動的に偏極し、高周波磁場を印加して核磁気共鳴を引き起こし、ホール抵抗値測定により核スピン偏極の変化の検出を行った。ナイトシフトは電子スピンとの相互作用により核磁気共鳴周波数が低エネルギー側にシフトする現象であり、ここではゲート電圧の印加により電子系を消失させて高周波磁場を印加することで、電子系との相互作用を抑制した状態での核磁気共鳴周波数を決定し、電子系がある場合の核磁気共鳴周波数との差としてナイトシフトを決定した。抵抗検出型核磁気共鳴スペクトルの明瞭な変化が観測され、局所領域ナイトシフト測定技術を確立した。さらにサイドゲート電圧により量子ホール端状態の位置を変化させながらナイトシフト測定を行うことにより、局所ナイトシフトの空間分解、つまり局所電子スピン偏極率の空間分解検出に成功した。量子ホール端状態近傍においてスピネクスターが形成されていることを示唆する実験結果を得た。

### 量子ホール系バルク状態における動的核スピン偏極とナイトシフト測定

量子ホール系バルク状態において動的核スピン偏極を生じさせ抵抗検出型核磁気共鳴検出を実現するために、量子ホール効果ブレークダウンを利用する手法を試みた。奇数整数の量子ホール状態において臨界電流値以上の電流を印加することにより、電子が高エネルギー側のランダウサブバンドに励起され、伝導電子となって有限の縦電圧が生じる。この過程において電子スピン反転が伴うため、超微細相互作用を通じて核スピンを動的に偏極できる。動的核スピン偏極は実効的なゼーマン分離を縮小してブレークダウンが促進させるため、電気抵抗値の変化として核スピン偏極が検出できる。高周波磁場を印加し、縦電圧測定による核磁気共鳴スペクトル測定を行ったとこ

る、核磁気共鳴スペクトルが観測された。高周波磁場の印加過程において、ゲート電圧により電子系のランダウ準位充填率を制御することで、電子スピン-核スピン相互作用を調整し、ナイトシフト測定を行った。抵抗検出型核磁気共鳴スペクトルの明瞭な変化が観測された。さらにランダウ準位充填率依存性において、スピントクスチャーの存在によるナイトシフトの抑制と核スピン緩和の促進が観測された。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 14 件)

1. S. Masubuchi, K. Hamaya, and T. Machida, Estimation of electrically pumped dynamic nuclear polarization in quantum Hall device using tilted magnetic fields, Jpn.J.Appl. Phys. **45**, L522-L524 (2006), 査読有
2. S. Masubuchi, K. Hamaya, and T. Machida, Knight shift detection using gate-induced decoupling of the hyperfine interaction in quantum Hall edge channels, Appl. Phys. Lett. **89**, 062108-1-3 (2006), 査読有
3. S. Masubuchi, K. Hamaya, and T. Machida, Gate-controlled nuclear magnetic resonance in an AlGaAs/GaAs quantum Hall device, Appl. Phys. Lett. **89**, 202111-1-3 (2006), 査読有
4. K. Hamaya, S. Masubuchi, K. Sawano, Y. Shiraki, and T. Machida, Spin dependence of edge-channel transport in silicon-based quantum Hall system, phy. stat. sol. (C) **3**, 4251-4254 (2006), 査読有
5. S. Masubuchi, K. Hamaya, and T. Machida, Estimation of dynamic nuclear polarization in quantum Hall devices using tilted magnetic fields, phy. stat. sol. (C) **3**, 4384-4387 (2006), 査読有
6. S. Masubuchi, K. Hamaya, and T. Machida, Local detection of Knight shift around quantum Hall edge channels using resistively-detected NMR, phy. stat. sol. (C) **3**, 4368-4371(2006), 査読有
7. S. Masubuchi, K. Hamaya, and T. Machida, Electrical polarization of nuclear spins in a breakdown regime of quantum Hall effect, Appl. Phys. Lett. **90**, 022102-1-3 (2007), 査読有
8. K. Hamaya, K. Sugihara, H. Takahashi, S. Masubuchi, M. Kawamura, T. Machida, K. Sawano, and Y. Shiraki, Spin-dependent nonlocal resistance in Si/SiGe quantum Hall conductor, Phys. Rev. B **75**, 033307-1-4 (2007), 査読有
9. H. Takahashi, M. Kawamura, S. Masubuchi, K. Hamaya, T. Machida, Y. Hashimoto, and S. Katsumoto, Electrical coherent control of nuclear spins in a breakdown regime of quantum Hall effect, Appl. Phys. Lett. **91**, 092120-1-3(2007), 査読有
10. M. Kawamura, H. Takahashi, S. Masubuchi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, K. Hamaya, and T. Machida, Dynamic nuclear polarization in a quantum Hall corbino disk, J. Phys. Soc. Jpn.**77**, No.2, 023710-1-4 (2008), 査読有
11. M. Kawamura, H. Takahashi, S. Masubuchi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, K. Hamaya, and T. Machida, Dynamic nuclear polarization and Knight shift measurements in a breakdown regime of integer quantum Hall effect, Physica E **40** 1389-1391 (2008), 査読有
12. K. Sugihara, K. Hamaya, M. Kawamura, K. Sawano, Y. Shiraki, and T. Machida, Valley-splitting edge-channel transport in a Si/SiGe quantum Hall system, Physica E **40** 1523-1525(2008), 査読有
13. S. Masubuchi, K. Suga, M. Ono, K. Kindo, S. Takeyama, and T. Machida, Observation of half-integer quantum Hall effect in single-layer graphene using pulse magnet, J. Phys. Soc. Jpn.**77**, 113707-1-4 (2008), 査読有
14. M. Kawamura, H. Takahashi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto and T. Machida, Coherent manipulation of nuclear spins in the breakdown regime of integer quantum Hall states, Journal of Physics: Conference Series **150**, 02203-1-4 (2009), 査読有

[学会発表](計 33 件)

1. 川村稔、山下達也、高橋裕之、増淵覚、橋本義昭、勝本信吾、町田友樹、量子ホール系  $\nu = 1$  近傍における核スピン位相緩和、日本物理学会第 64 回年次大会、2009.3.27、東京
2. M. Kawamura, M. Ono, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, and T. Machida, Nuclear spin polarization induced by breakdown of fractional quantum Hall effect, International Symposium on Nanoscale transport and technology (NTT2009), 2009.1.20, Atsugi, Japan

3. S. Masubuchi, M. Ono, K. Suga, S. Takeyama, and T. Machida, Observation of quantum Hall effect and magnetoresistance effect in single-layer grapheme, The International Symposium on Graphene Devices: Technology, Physics, and Modeling (ISGD 2008) 2008.11.19, Aizu, Japan
4. 川村稔、小野雅司、橋本義昭、勝本信吾、町田友樹、動的核スピン偏極による  $\nu=2/3$  分数量子ホール状態のスピン相転移点シフト、日本物理学会 2008 年秋季大会、2008.9.20、岩手
5. 山下達也、高橋裕之、川村稔、橋本義昭、勝本信吾、町田友樹、量子ホール効果ブレイクダウンを利用した歪みによる電気四重極分離の観測、日本物理学会 2008 年秋季大会、2008.9.20、岩手
6. M. Kawamura, H. Takahashi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, and T. Machida, Coherent manipulation of nuclear spins in the breakdown regime of integer quantum Hall states, 25th international conference on Low Temperature Physics (LT25), 2008.8.12, Amsterdam, Netherlands
7. 高橋裕之、川村稔、増淵覚、橋本義昭、勝本信吾、浜屋宏平、町田友樹、量子ホール効果ブレイクダウンを利用した核スピンのコヒーレント制御、2008 年春季第 55 回応用物理学会、2008.3.30、千葉
8. 川村稔、小野雅司、橋本義昭、勝本信吾、浜屋宏平、町田友樹、分数量子ホール効果ブレイクダウン領域における動的核スピン偏極、日本物理学会第 63 回年次大会、2008.3.23、大阪
9. 杉原加織、浜屋宏平、澤野憲太郎、白木靖寛、川村稔、町田友樹、Si/SiGe 量子ホールダイオードにおけるトンネル電流のスピン依存性、日本物理学会第 63 回年次大会、2008.3.23、大阪
10. 高橋裕之、川村稔、小野雅司、橋本義昭、勝元信吾、浜屋宏平、町田友樹、量子ホール効果ブレイクダウンを利用した核スピンの偏極と制御、日本物理学会第 62 回年次大会、2007.9.21、北海道
11. 小野雅司、川村稔、高橋裕之、橋本義昭、勝本信吾、浜屋宏平、町田友樹、量子ホール効果ブレイクダウンの動的核スピン偏極効率、日本物理学会第 62 回年次大会、2007.9.21、北海道
12. M. Kawamura, H. Takahashi, S. Masubuchi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, K. Hamaya, and T. Machida, Electrical manipulation of nuclear spins in a breakdown regime of quantum Hall effect, The 15th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS15), 2007.7.27, Tokyo, Japan
13. K. Sugihara, K. Hamaya, M. Kawamura, K. Sawano, Y. Shiraki, and T. Machida, Valley-splitting edge-channel transport in a Si/SiGe quantum Hall system, International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems and Modulated Semiconductor Structures (EP2DS), 2007.7.18, Genova, Italy
14. S. Masubuchi, M. Kawamura, H. Takahashi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, K. Hamaya, and T. Machida, Dispersive NMR line shapes in quantum Hall systems near  $\nu=1$  studied by Knight shift measurements, International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems and Modulated Semiconductor Structures (EP2DS), 2007.7.18, Genova, Italy
15. M. Kawamura, H. Takahashi, S. Masubuchi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, K. Hamaya, and T. Machida, Dynamic nuclear polarization and Knight shift measurements in a breakdown regime of integer quantum Hall effect, International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems and Modulated Semiconductor Structures (EP2DS), 2007.7.17, Genova, Italy
16. H. Takahashi, M. Kawamura, S. Masubuchi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, K. Hamaya, and T. Machida, Coherent manipulation of nuclear spins in a breakdown regime of quantum Hall effect, International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems and Modulated Semiconductor Structures (EP2DS), 2007.7.16, Genova, Italy
17. 増淵覚、浜屋宏平、町田友樹、AlGaAs/GaAs 量子ホール系における核磁気共鳴周波数のゲート電圧制御、2007 年春季 応用物理学会、2007.3.29、相模原
18. 杉原加織、浜屋宏平、町田友樹、澤野憲太郎、白木靖寛、Si/SiGe 量子ホール系における谷分離端状態伝導、日本物理学会 2007 年春季大会、2007.3.19、鹿児島
19. 川村稔、杉原加織、高橋裕之、浜屋宏平、村木康二、町田友樹、分数量子ホール端状態における動的核スピン偏極、日本物理学会 2007 年春季大会、2007.3.18、鹿

- 児島
20. 高橋裕之、川村稔、増淵覚、浜屋宏平、橋本義昭、勝本信吾、町田友樹、量子ホール効果ブレイクダウンを利用した核スピン制御、日本物理学会 2007 春季大会、2007.3.18、鹿児島
  21. 増淵覚、川村稔、高橋裕之、浜屋宏平、橋本義昭、勝本信吾、町田友樹、 $\nu=1$  近傍の量子ホール系における抵抗検出型 NMR の特異なスペクトル形状、日本物理学会 2007 春季大会、2007.3.18、鹿児島
  22. T. Machida, Nuclear spin control in quantum Hall systems, International Conference on Nanoelectronic, Nanostructures, and Carrier Interactions, (NNCI2007), 2007.2.21, Atsugi, Japan
  23. H. Takahashi, K. Sugihara, S. Masubuchi, M. Kawamura, K. Hamaya, and T. Machida, Dynamic nuclear polarization induced by inter-edge-bulk scattering in quantum Hall system, PASPS -11 半導体スピン工学の基礎と応用、2006.12.15、千葉
  24. M. Kawamura, H. Takahashi, S. Masubuchi, K. Hamaya, T. Machida, Y. Hashimoto and S. Kastumoto, Dynamic nuclear polarization and Knight Shift measurement in a breakdown regime of quantum Hall effect, PASPS -11 半導体スピン工学の基礎と応用、2006.12.15、千葉
  25. 町田友樹、量子ホール系を利用した半導体スピン制御と Si/SiGe 二次元電子系における電子輸送現象、第 9 回マイテック産学技術交流会「シリコンナノ科学」研究プロジェクト成果報告会、2006.11.30、東京
  26. 川村稔、高橋裕之、杉原加織、増淵覚、浜屋宏平、町田友樹、整数量子ホール効果ブレイクダウンを利用した動的核スピン偏極、日本物理学会 2006 秋季大会、2006.9.25、千葉
  27. 増淵覚、浜屋宏平、町田友樹、抵抗検出 NMR を利用したナイトシフトの空間分布測定、日本物理学会 2006 秋季大会、2006.9.25、千葉
  28. 高橋裕之、杉原加織、増淵覚、川村稔、浜屋宏平、町田友樹、エッジバルク間非平衡分布による動的スピン偏極、日本物理学会 2006 秋季大会、2006.9.25、千葉
  29. 杉原加織、高橋裕之、増淵覚、川村稔、浜屋宏平、澤野憲太郎、白木靖寛、町田友樹、Si/SiGe 量子ホール系における非局所抵抗のスピン依存性、日本物理学会

- 2006 秋季大会、2006.9.25、千葉
30. S. Masubuchi, K. Hamaya, and T. Machida, Local detection of Knight shift around quantum Hall edge channels using resistively detected NMR, The 4th Int. Conf. on Physics and Application of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PASPS-IV), 2006.8.18, Sendai, Japan
  31. K. Hamaya, S. Masubuchi, K. Sawano, Y. Shiraki, and T. Machida, Spin dependence of edge-channel transport in silicon-based quantum Hall systems, The 4th Int. Conf. on Physics and Application of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PASPS-IV), 2006.8.16, 2006.8.16, Sendai, Japan
  32. S. Masubuchi, K. Hamaya, and T. Machida, Estimation of dynamic nuclear polarization in quantum Hall devices using tilted magnetic fields, The 4th Int. Conf. on Physics and Application of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PASPS-IV), 2006.8.15, Sendai, Japan
  33. S. Masubuchi, K. Hamaya, and T. Machida, Spatial distribution of Knight shift around quantum Hall edge channels using resistively detected NMR, 17th Int. Conf. on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (HMF), 2006.7.31, Würzburg, Germany

【図書】(計 0 件)  
 【産業財産権】  
 出願状況 (計 0 件)

名称：  
 発明者：  
 権利者：  
 種類：  
 番号：  
 出願年月日：  
 国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：  
 発明者：  
 権利者：  
 種類：  
 番号：  
 取得年月日：  
 国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

町田 友樹 (MACHIDA TOMOKI)  
東京大学・生産技術研究所・准教授  
研究者番号：00376633

(2) 研究分担者 なし  
( )

研究者番号：

(3) 連携研究者 なし  
( )

研究者番号：